

**Нижник Ю. Н., Муравьев А. В.**

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина*

## **Аддитивные технологии и перспективы их применения**

Человеку, который никогда не встречался с 3D-печатью, может показаться, что 3D-принтер – это ультрасовременная технология, однако инженеры и ученые работают с этим удивительным оборудованием начиная с 1983 года. Это было время, когда американский инженер по имени Чарльз Халл изобрел первый в мире 3D-принтер. Успех работы стал фундаментом для дальнейшего развития широчайшего спектра направлений науки и техники и лег в основу современных аддитивных технологий.

В 90-е годы методы 3D-печати считались пригодными только для изготовления функциональных или эстетических прототипов, однако технология трехмерной печати впоследствии значительно расширила горизонты для медицины, промышленности, образования и науки. По состоянию на 2021 год точность воспроизведения объектов и номенклатура используемых материалов увеличились настолько, что некоторые процессы 3D-печати уже стали пригодными для промышленного производства [1].

На сегодняшний день "3D-печать" охватывает различные процессы, которые зачастую реализовываются путем послойного создания трехмерных объектов на основе их виртуальной модели. Виртуальная модель – это цифровая 3D-модель для печати, которая может быть создана с помощью специальной компьютерной среды CAD (computer aided design), 3D-сканера или обычного цифрового фотоаппарата и фотограмметрии. 3D-печатные модели, созданные с помощью CAD программ, имеют значительно меньше ошибок и могут быть скорректированы перед печатью, а также позволяют проверить параметры модели и дизайн объекта еще до начала его воспроизведения.

Все виды технологий 3D-печати, которые широко используются сегодня, можно классифицировать по следующим процессам, лежащим в основе принципа работы такой техники [2, 3]:

1. Экструзия материала (Material Extrusion Fused deposition Modeling (FDM));
2. Полимеризация (Vat Polymerization: SLA (Stereolithography) and DLP (DigitalLight Processing));
3. Синтез порошкового слоя (полимеры) (Powder Bed Fusion (polymers): Selective Laser Sintering (SLS));
4. Синтез порошкового слоя (металлы) (Powder Bed Fusion (metal): Direct Metal Laser Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Electron Beam Melting (EBM));
5. Струйное нанесение вяжущего агента (Binder Jetting: Sand and Metal Binder Jetting (BJ));
6. Струйное нанесение материала (Material Jetting: Material Jetting (MJ), Drop on Demand (DOD)).

Основные различия между этими процессами заключаются в способе нанесения слоев для создания деталей и используемых материалов. Каждый метод при этом имеет свои преимущества и недостатки. К основным характеристикам 3D-принтера на сегодняшний день, как правило, относят: скорость печати, точность позиционирования, затратность, номенклатуру используемых материалов, а также цветные возможности печати деталей.

Кратко рассмотрим принципы работы современных 3D-принтеров, построенных по указанным выше технологиям печати, после чего проведем сравнительный анализ их возможностей и особенностей, результаты которого приведены в таблице 1.

*Экструзия материала.* Процесс 3D-печати, при котором нить твердого термопластичного материала разогревается и переходит в жидкое состояние. Принтер распределяет материал по заданным координатам, где нить охлаждается

и затвердевает. После того, как текущий слой будет завершен, принтер переходит к построению следующего. Этот процесс печати сечений повторяется, отстраивая слой за слоем, до полного формирования объекта. Устройства, использующие экструзию материалов, самые распространенные и бюджетные среди всех технологий 3D-печати. Сегодня такая технология нашла применение при прототипировании, изготовлении шаблонов для литья и корпусных элементов различных конструкций.

*Полимеризация.* В качестве конструкционного материала этой технологии используют фотополимерную смолу, объем которой в определенных областях облучают источником света. Две самые распространенные формы полимеризации на сегодня – это SLA (стереолитографии) и DLP (Digital Light Processing). Принципиальное отличие этих типов технологии 3D-печати – тип источника света, который они используют для затвердевания материала. Принтеры SLA используют точечный лазер, в отличие от воксельного подхода, применяемого принтером DLP, где затвердевание фотополимера происходит под воздействием ультрафиолетового излучения. Полимеризация в качестве технологии 3D-печати широко применяется при изготовлении, например, ювелирных изделий.

*Синтез порошкового слоя (полимеры).* Процесс 3D-печати, при котором источник тепловой энергии избирательно расплавляет слой термопластичного порошка для формирования твердотельного объекта. Технология нашла применение при изготовлении функциональных элементов и деталей сложной формы, которые предусматривают низкий уровень эксплуатации при невысоких нагрузках и относительно короткий срок службы.

*Синтез порошкового слоя (металлы).* Процесс 3D-печати, который формирует объекты, используя тепловой источник для индуцирования синтеза частиц металлического порошка. В качестве материалов при этом выступают порошковые алюминий, нержавеющая сталь, титан. Детали, сформированные по

этой технологии, широко применяемые сегодня в медицине (хирургии и стоматологии) для протезирования [4, 5].

За последние годы активного развития 3D-печати технология лазерного синтеза порошкового слоя (Laser Powder Bed Fusion (LPBF)) получила много достижений, однако аддитивное производство металлических деталей, особенно при наличии сложной геометрии и новых материалов, все еще предусматривает некоторые технологические ограничения, которые необходимо преодолеть [6]. Одной из главных проблем для исследований и разработок в этом секторе является необходимость улучшения стабильности, повторяемости и расширение возможностей таких печатных систем.

*Струйное нанесение вяжущего агента.* Процесс 3D-печати, при котором жидкий агент избирательно связывает участки порошкового слоя. Эта технология требует наличия начального слоя порошка на платформе. Такой принтер перемещает печатающую головку над поверхностью металлического порошка, осаждая капли жидкого агента. Эти капли связывают частицы порошка вместе, чтобы образовать слой предмета. После этого, напечатанный слой опускается, а на него наносится новый слой порошка. Этот процесс повторяется до полного формирования объекта. Затем предмет оставляют в порошке для затвердевания, а остатки удаляют с помощью сжатого воздуха.

*Струйное нанесение материала.* Принцип работы такого 3D-принтера аналогичен обычному струйному принтеру. Ключевое отличие заключается в том, что печатающая головка выпускает сотни крошечных капель фотополимерной смолы, а затем закрепляет материал с помощью ультрафиолетового излучения. После того, как определенный слой нанесен, и процесс его затвердевания завершился, платформа сборки опускается вниз на толщину слоя, а затем цикл повторяется до полного формирования 3D-объекта. Технология нашла применение при изготовлении инжекторных форм с небольшим пробегом,

создании прототипов изделий и медицинских моделей с возможностью получения разноцветных объектов.

Таблица 1. Сравнительный анализ возможностей технологий 3D-печати

Название технологии	Преимущества	Недостатки	Точность размеров, мкм
Экструзия материала	Самая низкая стоимость; многоматериальная печать; сложная геометрия изделий; простота использования	Ломкость; нельзя использовать в качестве механических деталей	50
Полимеризация	Гладкая поверхность объекта; сложная форма деталей; высокая точность	Ломкость; небольшой выбор материалов	15-30
Синтез порошкового слоя (полимеры)	Хорошие механические свойства; функциональные детали	Требует больше времени; высокая стоимость	30
Синтез порошкового слоя (металлы)	Прочность; функциональные детали; высокая точность	Небольшие размеры изделия; самая дорогая из всех технологий печати	10
Струйное нанесение вяжущего агента	Низкая стоимость; большие объемы наращивания; функциональные металлические детали	Хуже механические свойства, чем в технологии синтеза порошкового слоя (металлы)	20
Струйное нанесение материала	Лучшая обработка поверхности; разноцветная и многоматериальная печать; высокая скорость	Ломкость; нельзя использовать в качестве механических деталей	10

На сегодняшний день технологии 3D-печати применяется в различных отраслях промышленности для производства узлов техники, игрушек, обуви, мебели, аксессуаров мобильных телефонов, инструментов или даже художественных работ. Рассмотрим примеры наиболее впечатляющих

современных применений трехмерной печати для различных нужд человечества, которые были заявлены в последнее десятилетие.

По состоянию на 2012 год струйная биотехнологическая 3D-печать применяется для изготовления органов и частей человеческого тела. В ходе процесса слои живых клеток оседают на гелиевую среду или сахарную матрицу и медленно накапливаются, образуя трехмерные структуры, включая сосудистые системы. Недавно было создано сердце на микросхеме, которое соответствует параметрам настоящего.

В 2015 году создан вариант многоцелевого истребителя Royal Air Force Eurofighter Typhoon с печатными деталями.

Благодаря машине ВААМ (Big Area Additive Manufacturing) крупные изделия, такие как 3D-печатные дома или автомобили, стали вполне реальными. Летом 2018 впервые в истории семья из 5 человек поселилась в доме, созданном методом трехмерной печати. Стены дома, площадь которого  $95 \text{ м}^2$ , были напечатаны за 54 часа. Конечная стоимость сооружения оказалась на 20% ниже, чем могла быть при использовании традиционных технологий. Сегодня в США на основе технологии 3D-печати возведены целые жилые кварталы, рыночная стоимость домов в которых более чем в два раза ниже по сравнению с использованием классических подходов для строительства.

В 2018 году итальянский биоинженер Джузеппе Скионти разработал технологию, позволяющую генерировать волокнистые аналоги мяса на растительной основе с помощью специального 3D-биопринтера, имитируя текстуру мяса и его пищевые ценности. NASA рассматривает данную технологию для создания 3D-печатной пищи с целью ограничения пищевых отходов и приготовления еды в космосе.

В медицинской промышленности недавно возникла концепция 3D-печатных таблеток и вакцин, где несколько препаратов объединены вместе в нужной

последовательности. Использование 3D-печати в медицине также позволило создать действительно персонализированные имплантаты [7].

Кроме огромного количества неоспоримых преимуществ и широкие перспективы применение технологии 3D-печати, как показали последние исследования, несут в себе и возможную опасность для здоровья человека. Исходя из исследований на животных, углеродные нанотрубки и углеродные нановолокна, которые иногда используются для печати с плавлеными нитями, могут вызвать легочные эффекты, включая воспаление и другие заболевания. Национальный институт безопасности и гигиены труда (NIOSH) отметил, что выбросы частиц из расплавленной нити достигают максимума через несколько минут после начала печати и возвращаются к базовому уровню через 100 минут после её окончания. Рабочие также могут нечаянно транспортировать такие материалы за пределы рабочего места на обуви, одежде и теле, что может представлять опасность для других людей.

Выбросы углеродных наночастиц и процессы, использующие порошковые металлы, легко горючи и повышают риск взрыва пыли. Контроль безопасности на таком производстве требует использования крышек и полных корпусов, поставляемых серийными производителями 3D-принтеров, надлежащую вентиляцию, нахождение работников на удалении от работающей техники, использование респираторов и материалов с меньшим уровнем вредных выбросов.

Наиболее распространенная на сегодняшний день технология 3D-печати (46% по состоянию на 2018 год) – экструзия материала, что обусловлено её низкой стоимостью и простотой в использовании. Одним из ключевых преимуществ 3D-печати является возможность создания объектов чрезвычайно сложной формы, а необходимым условием реализации – наличие цифровой 3D-модели или файла CAD программы.

3D-принтер, позволяющий использовать одновременно несколько конструкционных материалов, является основным элементом развития будущих

технологий трехмерной печати. Многие эксперты предсказывают создание фабрик нового формата, которые смогут производить буквально все, что угодно, благодаря универсальности аддитивных технологий и возможностям масштабировать принтер до размеров целого дома.

### **Литература:**

1. Redwood B. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications / B. Redwood, S. Filemon et al. // 3D Hubs. – 2017. – 304 p.
2. Муравйов О. В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / О. В. Муравйов, О. О. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2017. – вип. №1. – С. 124-131.
3. Муравьёв А.В. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / А.В. Муравьёв, Е.А. Назарчук // Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-199.
4. Murphy S. V. 3D bioprinting of tissues and organs / S.V. Murphy, A. Atala // Nature Biotechnology. – 2014. – № 32, pp. 773-785.
5. Назарчук О. О. Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа / О. О. Назарчук, О. В. Муравйов. // Біомедична інженерія. – 2017. – №5. – С. 66–67.
6. Тягур В. М. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В. М. Тягур, А. В. Муравьёв, О. К. Кучеренко // Оптический журнал. – 2014. – том 81. – вип. №4. – С. 42-47.
7. Муравьёв А. В. Пассивная термостабилизация оптической системы тепловизора и перспективы его применения в медицинской диагностике / А. В. Муравьёв // Приборостроение – 2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции. – Минск, Белоруссия, 2017. – С. 385-387.